第 38 卷第 6 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.6
2018 年 3 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201703130422
郭云,梁晨,李晓文.基于水鸟保护的长江流域湿地优先保护格局模拟.生态学报,2018,38(6):1984-1993.
Guo Y, Liang C, Li X W.Systematic conservation planning for freshwater wetlands in the Yangtze River Basin based on waterfowl.Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):1984-1993.

# 基于水鸟保护的长江流域湿地优先保护格局模拟

郭　云[1],梁　晨[1,2],李晓文[1,*]

1 北京师范大学环境学院,北京　100875
2 北京清华同衡规划设计研究院有限公司,北京　100085

**摘要**:基于系统保护规划的理论和方法,以长江流域湿地为研究区,构建了基于气候、地貌分异的湿地生态地理综合分类单元,并将其作为宏观尺度湿地生态系统保护目标,同时考虑以湿地鸟类为代表的物种保目标,依托 Marxan 系统保护规划工具,确定了长江流域湿地保护具有不可替代性的优先保护格局。该格局能以最小的社会经济和土地资源代价最大程度的保护湿地生物多样性,对比现有湿地保护格局,最终确定了游离于现有保护体系外的湿地保护空缺。研究结果表明:长江流域源区和长江三角洲地区的湿地保护体系完善,无需新建保护区;金沙江流域湿地保护空缺主要分布在现有保护区周围,可以适当扩充保护区外围或调整边界;嘉陵江流域和长江上游干流流域的保护空缺严重,大面积集中在重庆西北部,乌江流域的贵州省习水县北部湖泊湿地存在保护空缺,这些区域建议适当新建保护区或者保护小区;长江中下游湿地保护空缺主要分布在湖北、湖南、江西与安徽境内的沿江湖泊湿地,建议建立湿地公园及合理进行河流岸坡修复。研究结果可为长江流域湿地保护体系调整、保护规划制定提供参考依据,从宏观层面上为长江流域湿地统筹保护及合理开发利用提供科学依据。

**关键词**:流域湿地;系统保护规划;优先保护格局;Marxan;长江流域

# Systematic conservation planning for freshwater wetlands in the Yangtze River Basin based on waterfowl

GUO Yun[1], LIANG Chen[1,2], LI Xiaowen[1,*]

1 *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*
2 *Beijing Tsinghua Tongheng Urban Planning & Design Institute, Beijing* 100085, *China*

**Abstract**: Considering limited manpower, funding, and land available for conservation projects, selecting a set of key areas to maintain biodiversity is important. The Yangtze River Basin (YRB) is a globally significant center for biodiversity but faces many threats and pressures. Previous research attempted to identify conservation gaps in the YRB based solely on species distribution in terrestrial ecosystems. This study focused on wetland ecosystem conservation patterns on an entire river basin scale. Systematic conservation planning (SCP) is a framework that has been developed to prioritize and manage habitats deemed important for the protection of natural values. We used SCP methods to define watersheds as planning units and developed a comprehensive map of wetland types, considering climatic factors and geomorphological factors as coarse-filter surrogates of biodiversity elements, which included 28 wetland classes. We integrated the distribution of 113 focal birds as fine-filter surrogates of biodiversity elements. Marxan is a software used to determine the optimal set of planning units to form a pattern that meets the protection target with the minimum of social economy cost and land resources. We used Marxan to identify a conservation priority pattern by calculating the irreplaceability of each unit. Then, we compared the priority pattern with the existing reserve system to analyze conservation gap in the YRB. The results showed that the wetlands at the source of the YRB are large and well-protected; the proportion of protected wetlands in the Jinshajiang sub-basin

**基金项目**:国家自然科学基金项目(31370535)
**收稿日期**:2017-03-13;　**网络出版日期**:2017-12-19

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lixw@bnu.edu.cn

arrived at 38.74% in the priority pattern, improved by 19.74% compared to the existing protection system. The protected proportion in the Ming-Tuo sub-basin is 7.05% at present, and improved to 22.08% after the optimization; the priority protection areas are mainly distributed in Sichuan. The additional proportions in the Jialinjiang sub-basin and the upper mainstream sub-basin are large with conservation gaps mainly distributed in Sichuan province; Dongting Lake Basin and Hanjiang sub-basin are relatively well-protected. The protected proportion of wetlands in the Poyang Lake basin can rise from 7.10% to 28.49% with the additional proportion rising up to 40.89% in the Taihu sub-basin; most conservation gaps in the middle and lower reaches of the Yangtze River were distributed among riparian wetlands. In summary, the main conservation gaps are distributed in Chongqing, Guizhou, Hunan, and Hubei provinces. The results provide a reference for conservation planning in the YRB. Moreover, the identification of priority conservation areas on a large scale can be used to influence the building of a well-connected protection network in each individual area. For conservation gaps in the middle and lower reaches of the Yangtze River, we can build wetland parks and restore the river bank. For small conservation gaps distributed around existing reserves, we can extend the boundary of the reserves or adjust their scope. The results provide decision makers with scientific evidence for conservation planning for Yangtze River wetlands, and enrich the examples of SCP for freshwater wetlands.

**Key Words**: freshwater wetlands; Systematic conservation planning; Conservation priority; Marxan; Yangtze River Basin

长江流域湿地是我国淡水湿地资源最为丰富的区域之一,湿地面积达 1154 万 $hm^2$,占全国湿地总面积的 21.5%[1]。由于横跨我国三大地理阶梯,覆盖不同气候带,地貌-气候分异孕育出丰富的流域湿地生态系统类型,从河流发源地的高原湖泊、沼泽湿地,长江上游的森林湿地,到长江中游的各类湖泊湿地集中区,以及入海口的滩涂湿地,为不同生物提供了多样的栖息生境,是世界生物多样性最丰富的区域之一[2]。然而由于人类长期对湿地资源不合理的开发利用,其湿地已大面积减少,湿地生物多样性骤减[1],成为我国经济发展与生态保护矛盾最为突出的区域之一。20 世纪 50 年代至今,仅江汉平原湖泊水面面积就由 7000 余 $km^2$ 减至 2400$km^2$。2012 年湖北省第二次湿地调查与 2000 年第一次调查相比,同口径自然湿地总面积减少 10.26 万 $hm^2$。同时,相关研究表明:长江流域湿地保护区现有保护体系的代表性仍不充分,没有形成基于流域连接性存在的保护效率不高[3-4]。针对于流域湿地,考虑到流域湿地结构完整性和流域单元连接性,应从流域尺度上强调湿地保护格局对流域湿地整体保护的贡献[5]。而湿地系统保护格局优化就是对以往局限于小尺度、孤立格局湿地保护模式的反思[6]。

系统保护规划是在基于生态区的生物多样性保护和保护空缺分析基础上发展起来的区域生物多样性保护规划方法。该方法强调 CARE 四原则保护理念,即所设置保护对象的互补性,充分性,代表性和高效性[7]。在此基础上选择保护对象,综合考虑保护格局所耗费的社会经济成本,通过设定合理的保护目标,通过基于退火算法的优化模型(如 Marxan),顺序确定对整体保护格局贡献率高同时耗费成本低的保护格局要素,最终确定具有不可替代性的优先保护格局,该格局能有效地提高保护效益[8-9]。该方法自创立近 20 年来已广泛应用于陆域生态系统,近 5 年来部分学者强调流域单元的连接性和流域过程的可持续性原则,将其运用于淡水流域湿地系统保护规划,取得了突出的研究成果[10-11]。

长江流域生物多样性丰富,目前已有不少学者针对长江流域生态系统生物多样性进行重点保护区域研究及保护空缺分析。Heiner 等人是基于长江上游淡水生态系统分类及专家建议的重要鱼类分布区分析得出长江上游区域水生生态系统的保护空缺[12]。李晓文、黄心一等分析了长江中游湿地保护空缺[13-14],徐卫华等基于长江流域重要保护物种分布格局确定了长江流域优先保护区域,其重要物种分布信息全面,但没有考虑湿地生态系统层面保护的目标[15]。但尚未基于流域湿地生态系统和物种分布,开展流域尺度上湿地保护优先格局的相关研究。目前整个长江流域湿地生态系统基于生物多样性的优先保护格局尚不清楚、基于现有的保护体系保护空缺没有确定和识别。因此,本研究着眼于长江流域淡水湿地生态系统的保护规划,通过设定流域单元作为规划单元,将基于长江流域气候-地貌分异的流域湿地分类单元作为生态系统水平保护目标并考

虑湿地水禽分布作为物种层面上的保护目标，基于系统保护规划构架，模拟确定了长江流域湿地保护的优先格局，基于原保护网络的基础上评估优化后体系的有效性以及保护空缺分析。本研究突出了基于淡水湿地生态系统保护自然属性的格局优化方法，其研究结果也为长江流域湿地生态保护优先区和生态保护红线的确定提供相关的决策信息。

## 1 研究区概况

发源于青藏高原唐古拉山脉长江流域，流经我国 19 个省份，在崇明岛注入东海。流域总面积达 1 80 万 $km^2$，自西向东横跨我国三大地理阶梯（图 1）。流域东部 2/3 区域受东亚季风气候影响，流域西部约 1/3 区域为高原季风区。充沛的水资源条件，加之气候、地貌的显著差异孕育了丰富的湿地资源，湿地总面积达 945.68 万 $hm^2$，是我国淡水湿地类型和数量最为丰富的区域[16-17]。长江上游海拔超过 4000m，主要湿地类型是高寒湿地和河谷湿地，其中大部分高原沼泽湿地分布于长江源头，湿地面积达 367.86 万 $hm^2$，生物多样性极为丰富[16,18]；长江中下游地区位于我国第三阶梯，地势平坦，是淡水湖泊湿地和人工湿地的集中分布区。其中长江中游湿地面积为 266.34 万 $hm^2$，是淡水湿地及生物多样性的关键生态区；长江下游湿地面积为 311.49 万 $hm^2$，在入海口处有大片滩涂湿地[18]。为保护长江流域代表性湿地生态系统，长江流域（截至 2016 年）已建立国家级湿地保护区 23 处。

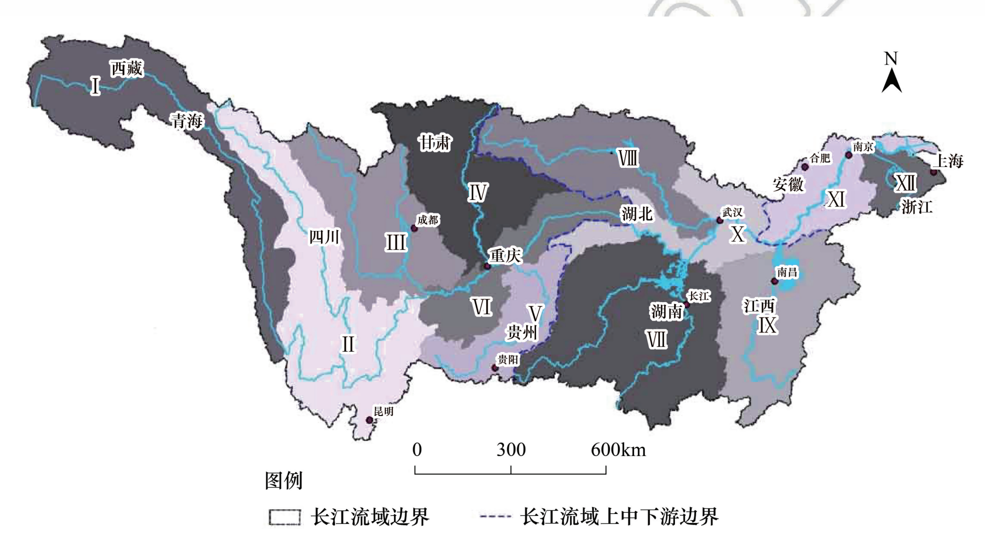



**图 1 长江流域及其子流域位置分布图**

**Fig.1 The map of Yangtze River Basin and its sub-catchments**

Ⅰ：金沙江石鼓以上 headwater sub-basin；Ⅱ：金沙江石鼓以下 Jingshajiang sub-basin；Ⅲ：岷沱江 Ming-Tuo sub-basin；Ⅳ：嘉陵江 Jialinjiang sub-basin；Ⅴ：乌江 Wujiang sub-basin；Ⅵ：长江上游干流流域 Upper mainstream sub-basin；Ⅶ：洞庭湖水系 Dongting Lake Basin；Ⅷ：汉江 Hanjiang sub-basin；Ⅸ：鄱阳湖水系 Poyang Lake basin；Ⅹ：长江中游干流流域 Middle mainstream sub-basin；Ⅺ：长江下游干流流域 Lower mainstream sub-basin；Ⅻ：太湖水系 Taihu sub-basin

## 2 研究方法

### 2.1 规划单元的设置

依据湿地生态系统特有的流域连接性，本研究采用 ArcHyro 工具建立适合尺度集水区单元作为系统保护规划格局模拟的规划单元[19]。集水区单元作为规划单元突出了流域湿地生态系统结构的完整性以及流域上下游之间的连续性。为兼顾 Marxan 模拟精度和计算能力的制约，基于敏感性分析本研究以 360$km^2$ 作为规划单元（集水区）平均面积，共包括规划单元 4916 个。设置规划使用 90m 分辨率 DEM 数据为美国太空总署（NASA）和国防部国家测绘局（NIMA）联合测量的 SRTM_DEM 数据，所采用长江流域水系分布数据源自全国

基础地理信息中心。

**2.2** 保护对象:湿地气候-地貌分类类型与物种分布区

对于生物多样性的保护其保护对象很难界定,系统保护规划一般将保护对象设为生态系统(生境)水平和物种水平的生物多样性的替代因子来规划。本研究综合考虑流域内地貌单元和气候类型等决定区域湿地生态水文过程的关键因子,为突出其气候地貌导致不同水文过程差异的显著性[20-23],将不同的湿地类型依据其所处的气候带和地貌类型细分为湿地气候-地貌分类类型,将其作为生态系统类型的多样性进行保护,是宏观层次的保护对象。其中湿地类型是基于中科院遥感科学国家重点实验室所提供的全国湿地遥感分类数据[24],地貌类型只考虑平原、丘陵、高原和山地主要地貌分异,气候类型为中国自然气候分区主要类型[25]。从全国湿地遥感分类数据中提取长江流域范围湿地类型(流域范围按全国水资源分区确定),将其与气候-地貌类型进行综合分类,最终确定长江流域范围内湿地气候-地貌综合分类类型共 28 种(表 1,图 2),将其作为生态系统水平保护对象设置于系统保护规划目标中。

**表 1　长江流域生态地理湿地类型**

**Table 1　The catalogue of eco-geographic wetland types in the Yangtze river**

| 湿地类型 Wetland category | 代码 Code | 湿地类型 Wetland category | 代码 Code |
|---|---|---|---|
| 暖温带湿润及半湿润区高原河流湿地 Warm temperate-humid and semi humid-Plateau-riverine wetland | WTHSH-PR | 亚热带湿润区山地湖泊湿地 Subtropical-humid-mountain-lacustrine wetland | SH-ML |
| 暖温带湿润及半湿润区高原湖泊湿地 Warm temperate-humid and semi humid-Plateau-lacustrine wetland | WTHSH-PL | 亚热带湿润区山地沼泽湿地 Subtropical-humid-mountain-marsh wetland | SH-MM |
| 暖温带湿润及半湿润区高原沼泽湿地 Warm temperate-humid and semi humid-Plateau-marsh wetland | WTHSH-PM | 亚热带湿润区丘陵河流湿地 Subtropical humid-hill-riverine wetland | SH-HR |
| 暖温带湿润及半湿润区山地河流湿地 Warm temperate-humid and semi humid-mountain-riverine wetland | WTHSH-MR | 亚热带湿润区丘陵湖泊湿地 Subtropical humid-hill-lacustrine wetland | SH-HL |
| 暖温带湿润及半湿润区山地湖泊湿地 Warm temperate-humid and semi humid-mountain-lacustrine wetland | WTHSH-ML | 亚热带湿润区丘陵沼泽湿地 Subtropical humid-hill-marsh wetland | SH-HM |
| 暖温带湿润及半湿润区山地沼泽湿地 Warm temperate-humid and semi humid-mountain-marsh wetland | WTHSH-MM | 亚热带湿润区平原河流湿地 Subtropical humid-plain-riverine wetland | SH-PR |
| 暖温带湿润及半湿润区山地滨海湿地 Warm temperate-humid and semi humid-mountain-coastal wetland | WTHSH-MC | 亚热带湿润区平原湖泊湿地 Subtropical humid-plain-lacustrine wetland | SH-PL |
| 暖温带湿润及半湿润区丘陵湖泊湿地 Warm temperate-humid and semi humid-hill-lacustrine wetland | WTHSH-HL | 亚热带湿润区平原沼泽湿地 Subtropical humid-plain-marsh wetland | SH-PM |
| 暖温带湿润及半湿润区丘陵沼泽湿地 Warm temperate-humid and semi humid-hill-marsh wetland | WTHSH-HM | 高原湿润区河流湿地 Highland humid-riverine wetland | H-HR |
| 亚热带湿润区滨海湿地 Subtropical humid-costal wetland | SH-C | 青藏高原湿润区湖泊湿地 Qinghai-Tibet Plateau-humid-lacustrine wetland | QTH-PL |
| 亚热带湿润区高原河流湿地 Subtropical humid- Plateau-riverine wetland | SH-PR | 青藏高原湿润区沼泽湿地 Qinghai-Tibet Plateau humid-marsh wetland | QTH-PM |
| 亚热带湿润区高原湖泊湿地 Subtropical-humid- Plateau-lacustrine wetland | SH-PL | 青藏高原干旱区河流湿地 Qinghai-Tibet Plateau arid-riverine wetland | QTA-PR |
| 亚热带湿润区高原沼泽湿地 Subtropical-humid- Plateau-marsh wetland | SH-PM | 青藏高原干旱区湖泊湿地 Qinghai-Tibet Plateau arid-lacustrine wetland | QTA-PL |
| 亚热带湿润区山地河流湿地 Subtropical humid-mountain-riverine wetland | SH-MR | 青藏高原干旱区沼泽湿地 Qinghai-Tibet Plateau arid-marsh wetland | QTA-PM |

物种水平保护目标主要采用湿地水禽,依其主要分布范围,湿地生境代表性和 IUCN 濒危等级,选择 113 种水鸟(图 3),其分布数据来源于中国鸟类观测中心网站(http://www.birdreport.cn/)并参考中国鸟类野外手册[26]。湿地鸟类,特别是濒危水禽多为食物链的顶级物种,对河流和非河流(湖泊、沼泽等)湿地生态系统健康均具有一定指示意义,且其种群分布数量和种群动态易于观测统计,故可以作为湿地生物多样性保护的指示物种,本研究由于鱼类、两栖类等其他生物类群分布数据缺乏,本研究仅将水鸟分布区作为物种水平保护目标。

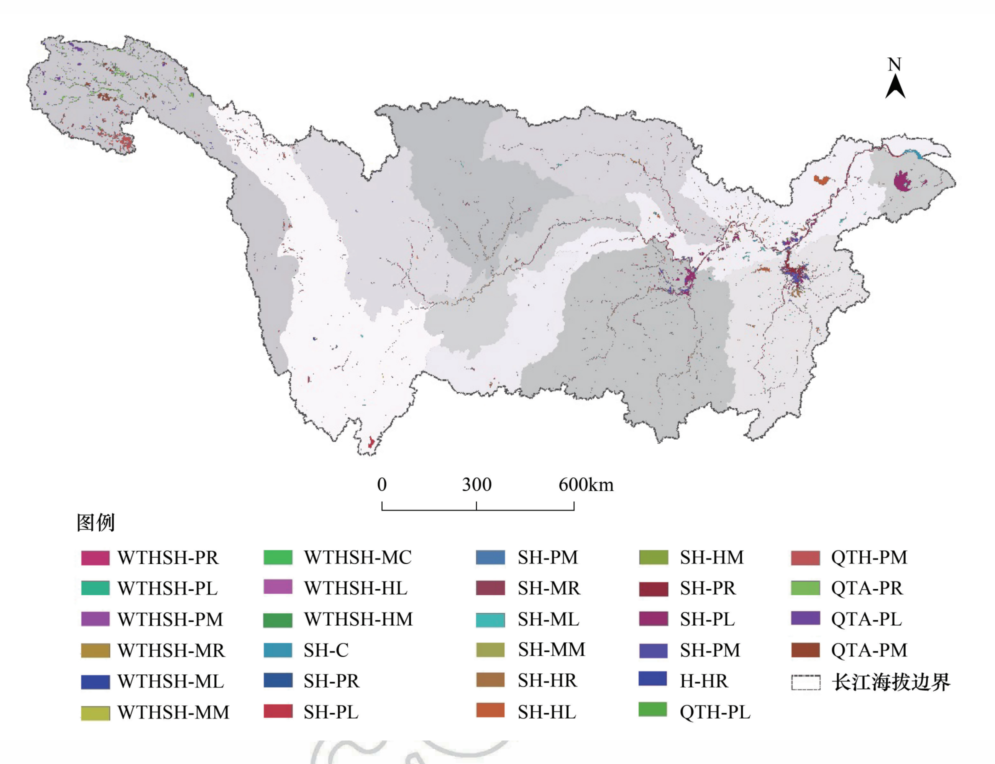



图 2 长江流域湿地生态地理综合分类类型及其空间分布(图例参数具体参见表 1)

Fig.2 The map of eco-geographic wetland types of Yangtze River Basin

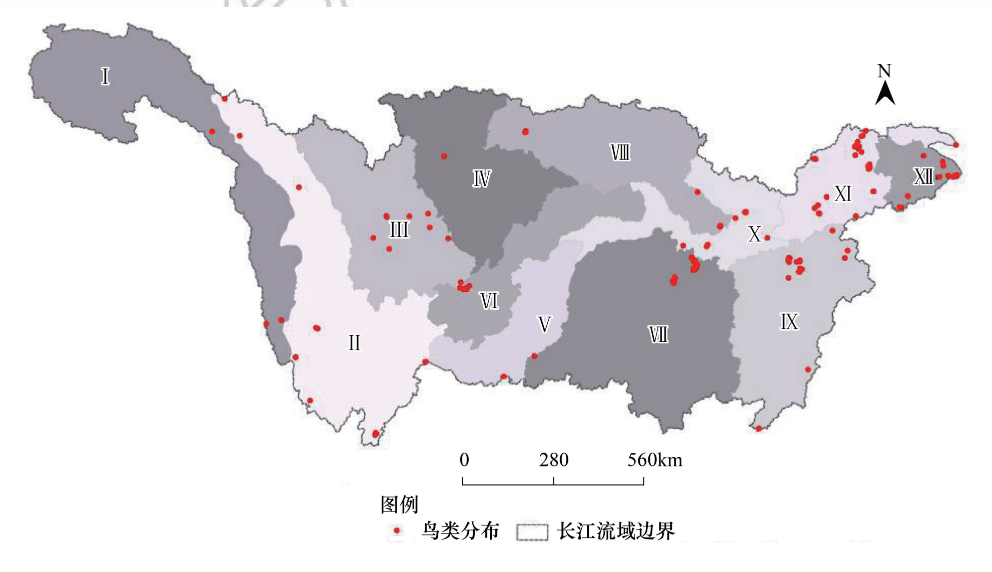



图 3 长江流域鸟类分布图

Fig.3 Distribution map of birds in the Yangtze River Basin

### 2.3　保护成本

在系统保护规划研究中,保护代价分析也可称生态完整性分析,或生境适宜性。其中代价指数与完整性指数是互为倒数的,保护代价越高就说明区域的生态完整性越差,受到的人为影响也越大,相对来说其生物多样性的适宜程度就越低。本研究其实是基于这样一个理念:完整的生物学系统能有效地支撑和维持生物学要素和生态过程[27]。由于难以直接度量保护代价,因此参照梁晨等[28]相关研究,选取了公路、铁路、城镇、农村居民点和水坝和保护区构建人为干扰指数,作为计算集水单元保护代价的间接因子。将每个因子的度量标准化到0—1之间,然后乘以权重系数(表2),再相加,即得每个集水区的保护代价指数。最后再将基于公路、铁路、水坝、农村居民点和城镇分布等影响因子得出的保护代价指数用保护区覆盖面积来调整,得的最终保护代价指数分布,公式如下:

$$C = \sum_{j=1}^{n} \left( \frac{V_i - V_{i,\min}}{V_{i,\max} - V_{i,\min}} W_i \right) \tag{1}$$

$$C' = C(1-0.5R) \tag{2}$$

式中:$V_i$为每个集水区内因子$i$的度量值,$W_i$为因子$i$的权重,$j$为每个集水区内因子的个数,$C$为每个集水区调整前的代价值,$C'$为每个集水区经过保护区调整后的代价值,$R$为每个集水区内被保护区覆盖的面积比。

**表2　各影响因子的度量和权重**

**Table 2　The measurement and weights of the impact factors**

| 因子 Impact factors | 度量(每个集水区)Measurement | 权重系数 Weights |
|---|---|---|
| 公路 Road | 公路长度/河流长度 | 1 |
| 铁路 Railroad | 铁路长度/河流长度 | 1 |
| 城镇 Villages | 农村居民点个数/集水区面积 | 5 |
| 农村居民点 Settlements | 城镇面积/集水区面积 | 5 |
| 大坝 Dam | 大坝个数/集水区面积 | 20 |
| 保护区 Protected area status | 保护区面积/集水区面积 | |

### 2.4　格局优化及保护空缺识别

本研究运用系统保护规划的方法,利用基于空间优化模型-Marxan设计长江流域湿地优化格局,该模型基于退火算法依据空间规划单元(集水单元)对整体保护格局的贡献率,计算其不可替代性值,并确定其具有高不可替代性的规划单元作为优先保护格局。在优先格局模拟需设置优化的目标水平,参考IUCN陆地生态系统(包括水域)保护规划10%—30%的置标准,本研究选择其上限即各生态系统类型和物种分布范围的30%作为优化后应达到的保护比例。

另外,通过Marxan边缘长度调节(Boundary Length Modifer, BLM)模块来调节格局优化过程中保护格局的连接度和聚集度。一般认为连接度高、聚集度高的格局更有生物多样性的维持以及相对集中的保护格局也有利于湿地保护保护工作的实施和管理,但过于集中连片的保护区域会导致保护所需土地资源代价增加,为了权衡保护格局聚集度和保护代价,采用敏感性分析得到合理的BLM值, 0.00009。

最后,通过Marxan模型得到不可替代性高的地区作为优先保护的区域,通过对比优先保护格局与现有保护区分布格局,识别具有不可替代性保护价值,同时游离于现有保护体系之处的保护空缺,并在此基础上按照长江流域12个子流域的分区分别分析讨论不同分区中优化成效以及保护空缺情况。保护空缺分析所需湿地保护区数据主要是来源于世界自然保护区数据库(Word Database on Protected Area, http://www.wdpa.org/),经校正缺少长沙贡玛国家级自然保护区空间分布数据,由于对于整体的格局影响不大,本研究将其忽略。

## 3　结果与分析

### 3.1　各子流域湿地保护现状及其格局优化结果

模拟得到长江流域优化格局及现有保护体系分布格局(图4),长江流域源区(金沙江石鼓以上河段)是

高原湿地的集中区,湿地面积比例最大且湿地保护比例最大,基本纳入三江源和若尔盖国家级自然保护区范围。金沙江石鼓以下河段目前保护比例(现有保护的面积内的湿地面积/整个子流域湿地面积)为 19.74%,优化后保护比例(优先保护中湿地面积/整个子流域湿地面积))可以提升 19%,且保护空缺主要集中在海子山国家级自然保护区的周边。岷沱江子流域目前湿地保护比例是 7.05%,优化后保护比例提升至 22.08%,优化区域主要位于四川宜宾县范围。嘉陵江流域和长江上游干流流域的保护优化比例提升较大,其中长江上游干流流域优化后的保护比例提升为 42%,且优化格局集中。乌江流域优化后保护比例可提升 12%;洞庭湖水系和汉江水系目前湿地保护体系较为充分,优化后仅分别提升 6.60% 和 6.06%;鄱阳湖水系优化后湿地保护比例可从目前 7.10%提升至 28.49%。长江中游干流流域和长江下游干流流域分布数量较多的中小型湖泊湿地,优化后保护比例均提升了 15%。太湖水系湿地保护优化效果显著,优化比例提升可达 40.89%,表明该区域湿地保护亟待加强。

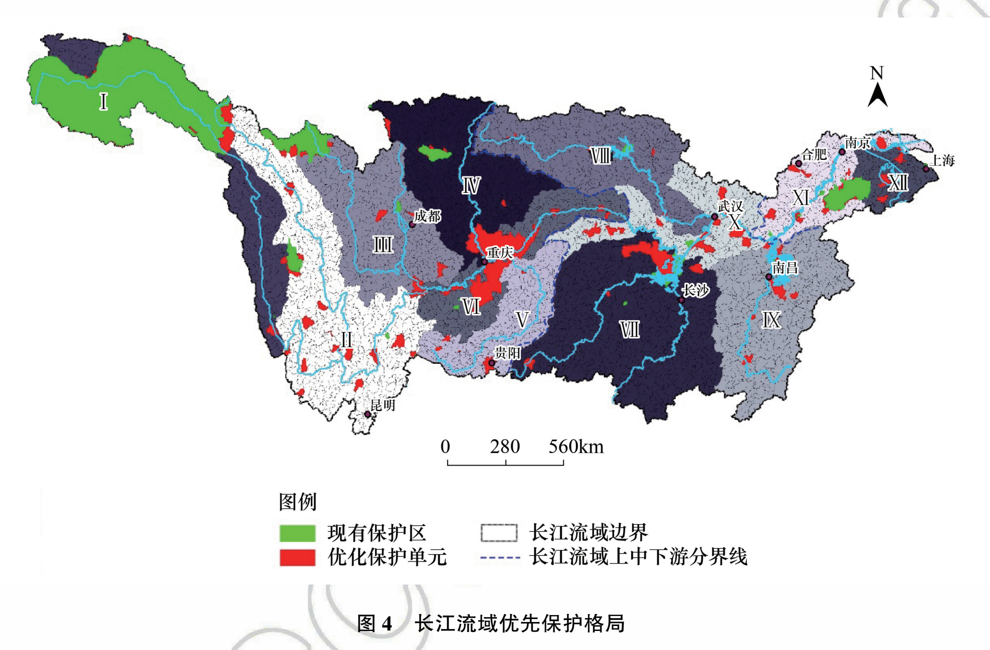



图 4 长江流域优先保护格局

Fig.4 The priority pattern for wetland conservation in the Yangtze River Basin

### 3.2 各子流域湿地及不同类型湿地保护空缺分析

基于长江各主要子流域单元,通过优先保护格局与现有国家级湿地保护区对比评估确定湿地保护空缺(图 5),结果表明:石鼓以下金沙江流域湿地保护空缺集中于青海玉树县、四川甘孜州石渠县西部、甘孜县南部和理塘县南部的高原湿地等区域;岷沱江和嘉陵江流域目前没有设立国家级湿地保护区,其中岷沱江子流域保护空缺主要分布在四川宜宾县长江北岸区域;嘉陵江流域和长江上游干流流域的保护空缺集中于重庆市域西北部;乌江流域只有 1 个国家级保护区,湿地保护空缺集中在贵州省习水县北部的湖泊湿地;洞庭湖水系和汉江水系共有国家级保护区 4 个,保护空缺主要局限在湖北省荆州市与湖南省益阳市、湖南省常德市交汇处,所占比例低;鄱阳湖水系及长江中游干流流域主要保护空缺则分布在江西上饶、南昌交界处和湖南新洲区;长江下游干流流域目前存在国家级保护区 6 个,数量最多,湿地保护空缺则主要为安庆市的沿江湿地群。

## 4 讨论

### 4.1 湿地保护格局优化建议

根据长江流域不同区域的保护空缺比例和格局以及人为干扰程度,将其分为四个主要区域提出保护规划建议。

(1)长江流域源区:该区域主要为高原沼泽湿地,在高原生态系统及生物多样性维持、水土保持、水源涵养、碳汇和气候条件方面发挥着重要的生态系统服务功能,虽然人为干扰程度相对较低,但湿地生态环境脆

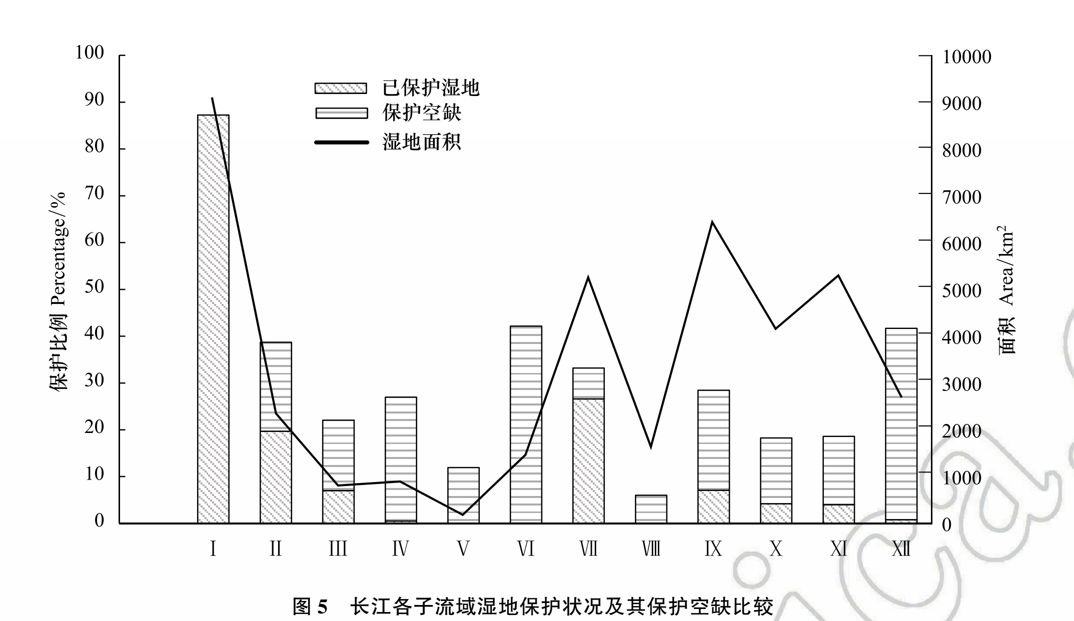



**图 5　长江各子流域湿地保护状况及其保护空缺比较**

**Fig.5　Comparing the area and the percentage of protected wetlands with those within conservation gaps based on the sub-catchments of Yangtze River Basin**

弱,农牧业发展和城镇化带来的道路基础设施建设等人为干扰活动是该区域湿地生态系统受到的主要威胁[29]。但由于该区域三江源、若尔盖等超大型国家保护区已基本覆盖主要湿地区域,因此建议对加强对保护区内外放牧和基础设施建设等人为活动的管理和合理规划,但不必再新建大面积湿地保护区。

(2)长江流域上游区域:该区域湿地类型以高原、山地河流湿地和密集分布的高原湖泊湿地群为主,以河溪和高原湖泊水生生物类群构成的生物多样性具有独特而重要的保护价值[30]。目前保护空缺面积较小,且相对集中于面积分布在青海隆宝国家级自然保护区和四川海子山国家级自然保护区附近。建议该区域可以适当扩大保护区外围或者调整边界以达到缩小保护空缺的目的。嘉陵江和长江上游干流流域保护空缺集中在重庆市辖范围,乌江流域保护空缺则分布在贵州省习水县北部,这些区域可以依据周边社会经济活动现状,设立湿地保护区或者保护小区加以保护,并管控放牧、开垦等人为活动。

(3)长江流域中下游区域:该区域是平原湖泊湿地类型集中分布区域,也是我国重要农业经济区,人口密集,湿地生态环境压力大,大规模的围垦和以水利水电设施建设导致江湖阻隔,湖泊湿地大面积被侵占,以濒危水禽和洄游鱼类代表的淡水生物多样性迅速退化消失,通江湖泊湿地原有蓄滞洪水和水体自净功能显著减弱[31]。该区域尽管已建立一定数量的湿地保护区,但除洞庭湖流域保护较为充分外,鄱阳湖、太湖流域及龙感湖等安庆沿江湖泊保护空缺仍较显著,考虑到这些区域人类社会经济活动的难以避免,可以采取建立湿地公园、湿地保护小区等兼顾湿地保护和资源利用的形式建立较为完善的湿地保护网络,一定程度上填补保护空缺。

(4)长江口湿地区域:该区域以崇明东滩和九段沙湿地为主的河口湿地是长江口规模最大、发育最完善的河口型潮汐滩涂湿地,该区域滩涂湿地越冬的水鸟总量逾百万只,是亚太地区迁徙水鸟的重要通道,也是多种生物周年性溯河和降河洄游的必经通道,具有国际意义的重要保护价值[32]。但大面积农业开发,港口和工业开发区建设,特别是沿海大堤等围填海工程建设以及米草等入侵植物的泛滥蔓延,导致滨海滩涂湿地面积萎缩,生态系统服务功能退化[33]。模拟结果显示,该区域主要滨海滩涂湿地已纳入湿地保护体系,保护空缺不显著,不必建立或扩展目前滨海湿地保护体系。但考虑到大坝建设和围填海活动对已保护湿地的长期累积性影响,应开展针对性的滨海湿地修复项目缓解围填海活动及海平面上升导致并加剧的滨海湿地海岸挤压效应的不利影响。用新建保护区,强化保护区管理措施。

### 4.2　研究展望

(1)研究不足

本研究在设置生态系统层次的保护对象时,将传统的湿地分类扩充为生态地理综合湿地分类系统,将处

于不同生态地理区域的不同湿地类型都纳入保护对象中,是应对气候变化合理的保护对象设置。然而由于宏观遥感技术手段的局限性,本研究中湿地系统的分类比较粗略,且由于数据的获取性,本文物种层次的保护对象只有鸟类,在之后的研究中需要增加鱼类等指示物种。此外,对于水禽类数据的处理,本研究只是筛选了列入 IUCN 里水禽的分布范围等值赋予权重,但是鸟类的濒危等级及不同集水区的生活阶段都不尽相同,在日后的研究中应加以考虑。本研究只有一种情景的设置,没有考虑多种成本、不同目标等的设置,也应在之后研究进行补充,有效说明该优化格局的不同优势的权衡。

(2) 建立湿地气候-地貌综合分类类型的必要性

本研究强调由于气候-地貌差异对湿地生态系统结构与功能差异性的塑造,初步建立了基于淡水湿地主要类型和大尺度气候-地貌分异的湿地气候地貌综合分类类型,并将其作为生态系统水平的保护目标。这一方面基于气候地貌影响下即便同类湿地所具有的不同生物多样性特征和生态系统服务功能得独特性和不可替代性;另一方面还考虑到未来气候变化驱动下不同湿地气候-地貌分类类型可能发生相互转变过程,对上述气候-地貌因素湿地类型的整体保护也将有利于维持气候变化背景下湿地生态系统类型和功能多样性的,强化其适应气候变化的潜力。因此,将湿地气候地貌类型纳入保护目标也可以作为流域湿地气候适应性管理的一种有效措施。长江流域面积广阔,因此本研究建立的是基于宏观尺度、主要类型的湿地气候-地貌分类类型。实际上,可以在系列不同分类精度上建立高的湿地气候-地貌分类类型以适用于不同尺度、不同地理背景的湿地保护规划研究。未来尚需针对不同湿地气候-地貌类型,开展相关生态系统服务功能和气候适应性变化,以不同修正其分类体系,并依其生态系统服务功能评估不同类型的保护价值,在此基础上提升流域湿地保护的科学性和有效性。

(3)强调对流域湿地纵行-横向-垂向连接性的保护

与陆域生态系统显著不同,流域湿地存在显著的纵向(上下游之间)、横向(河道-集水区)和垂向(地表水-地下水)的水文连接性[11,34]。以往陆域生态系统保护规划往往将湿地作为附属成分,其格局优化与保护规划评估过程中往往忽略了淡水湿地系统的三维连接性,其格局优化措施不利于维护流域湿地系统结构和功能的完整性以及减轻周边人类活动的影响。如忽视湿地核心护区上游湿地或周边汇水区土地利用管理,可能导致污染扩散,水文连通阻隔效应对核心保护湿地的负面影响。因此,需要建立一套适用于流域湿地系统,充分考虑其三维连接效应的保护规划和湿地格局优化方法。近年来,澳洲学者在基于流域湿地连接性保护做了大量开创性工作,但如何定量表征三维连通性的强弱,特别是地表水-地下水连通性度量,以及更大尺度上跨流域湿地功能的耦合和连接性表征等有待深入研究。

(4)系统保护与系统修复规划的整合

借鉴系统保护规划方法构架,探索系统修复规划(Systematic rehabilitation planning)是国际上系统保护规划发展的最新动向,并且首先在淡水湿地保护规划领域有所突破[35-36]。湿地系统修复规划针对以往过于重视局域尺度恢复成功,忽视恢复斑块彼此之间的整体格局优化的不足,强调区域湿地系统恢复之间的格局与功能关联,着眼于通过湿地恢复整体格局优化设计,充分提升区域湿地生态系统整体功能,而非仅仅局域尺度上的恢复成功[37]。未来应将流域湿地保育和恢复统一整合于流域湿地生态系统服务功能格局优化构架中,在系统保护与系统修复基础上进一步强调恢复格局与已有保护格局的格局与功能关联,及其保护-恢复整体格局的优化效应,克服以往保护与恢复格局彼此孤立分析辨识的局限[38]。使得湿地恢复不仅关注局域尺度湿地恢复的目标、可行性和具体措施,同时强调局域湿地修复对大尺度生态过程和生态系统服务功能的影响,以及湿地保护修复整体格局作为缓解人类活动-气候变化对流域湿地生态系统的共同影响的生态调控途径。

**参考文献(References):**

[1] 薛蕾, 徐承红. 长江流域湿地现状及其保护. 生态经济, 2015, 31(12): 10-13.
[2] 吕新华, 刘清. 长江流域的湿地资源及其恢复保护. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 70-73, 90-90.
[3] Abell R, Allan J D, Lehner B. Unlocking the potential of protected areas for freshwaters. Biological Conservation, 2007, 134(1): 48-63.

[4] 燕然然，蔡晓斌，王学雷，厉恩华，邓帆，李辉，姜刘志，赵素婷. 长江流域湿地自然保护区分布现状及存在的问题. 湿地科学，2013，11(1)：136-144.
[5] Zedler J B. Progress in wetland restoration ecology. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(10): 402-407.
[6] 李晓文，李梦迪，梁晨，诸葛海锦. 湿地恢复若干问题探讨. 自然资源学报，2014，29(7)：1257-1269.
[7] Margules C, Sarkar S. Systematic Conservation Planning. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
[8] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. Nature, 2000, 405(6783): 243-253.
[9] Kukkala A S, Moilanen A. Core concepts of spatial prioritisation in systematic conservation planning. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2013, 88(2): 443-464.
[10] Nel J L, Reyers B, Roux D J, Impson N D, Cowling R M. Designing a conservation area network that supports the representation and persistence of freshwater biodiversity. Freshwater Biology, 2011, 56(1): 106-124.
[11] Hermoso V, Linke S, Prenda J, Possingham H P. Addressing longitudinal connectivity in the systematic conservation planning of fresh waters. Freshwater Biology, 2011, 56(1): 57-70.
[12] Heiner M, Higgins J, Li X H, Baker B. Identifying freshwater conservation priorities in the Upper Yangtze River Basin. Freshwater Biology, 2011, 56(1): 89-105.
[13] 李晓文，郑钰，赵振坤，黎聪. 长江中游生态区湿地保护空缺分析及其保护网络构建. 生态学报，2007，27(12)：4979-4989.
[14] 黄心一，李帆，陈家宽. 基于系统保护规划法的长江中下游鱼类保护区网络规划. 中国科学：生命科学，2015，45(12)：1244-1257.
[15] 徐卫华，欧阳志云，张路，李智琦，肖燚，朱春全. 长江流域重要保护物种分布格局与优先区评价. 环境科学研究，2010，23(3)：312-319.
[16] 张阳武. 长江流域湿地资源现状及其保护对策探讨. 林业资源管理，2015，(3)：39-43.
[17] 赵丽惠. 国家重点基础研究发展规划项目：长江流域生物多样性变化、可持续利用与区域生态安全项目简介. 植物学报，2000，42(8)：879-880.
[18] 朱万泽，范建容，王玉宽，申旭红，田兵伟，魏宗华. 长江上游生物多样性保护重要性评价——以县域为评价单元. 生态学报，2009，29(5)：2603-2611.
[19] 宋晓龙，李晓文，张明祥，杨殿林，张黎娜，张贵龙. 黄淮海地区跨流域湿地生态系统保护网络体系优化. 应用生态学报，2012，23(2)：475-482.
[20] 邓侃. 湿地水文功能及其保护与管理. 林业资源管理，2013，(3)：23-27.
[21] 董李勤，章光新. 全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述. 水科学进展，2011，22(3)：429-436.
[22] 崔桢，沈红，章光新. 3 个时期莫莫格国家级自然保护区景观格局和湿地水文连通性变化及其驱动因素分析. 湿地科学，2016，14(6)：866-873.
[23] 孙万光. 气候变化对扎龙湿地水文特性影响的研究. 大连：大连理工大学，2006.
[24] 牛振国，宫鹏，程晓，虢建宏，王琳，黄华兵，沈少青，吴昀昭，王晓风，王显威，应清，梁璐，张丽娜，王雷，姚谦，杨镇钟，郭子祺，戴永久. 中国湿地初步遥感制图及相关地理特征分析. 中国科学 D 辑：地球科学，2009，39(2)：188-203.
[25] 中央气象局编制. 中华人民共和国气候图集. 北京：地图出版社，1979.
[26] Mackinnon J, Phillipps K. A Field Guide to the Birds of China. Lu H F, trans. Changsha: Hunan Education Press, 2000:102-106.
[27] Karr J R, Fausch K D, Angermeier P L, Yant P R, Schlosser I J. Assessing Biological Integrity in Running Waters. A Method and Its Rationale. Urbana, Illinois: Illinois Natural History Survey Special Publication, 1986, 5: 1-28.
[28] 梁晨，李晓文，崔保山，马田田. 中国滨海湿地优先保护格局构建. 湿地科学，2015，13(6)：660-666.
[29] 青海省统计局. 2008 青海统计年鉴. 北京：中国统计出版社，2008.
[30] 李纯，宁志光，陈亚琼，杨晓君. 云南拉市海高原湿地冬季水禽聚集情况变化. 国土与自然资源研究，2000，(3)：58-61.
[31] 王学雷，许厚泽，蔡述明. 长江中下游湿地保护与流域生态管理. 长江流域资源与环境，2006，15(5)：564-568.
[32] 高宇，赵峰，庄平，张婷婷. 长江口滨海湿地的保护利用与发展. 科学，2015，67(4)：39-42.
[33] 操文颖，李红清，李迎喜. 长江口湿地生态环境保护研究. 人民长江，2008，39(23)：43-45，58-58.
[34] Ricciardi A, Rasmussen J B. Extinction rates of North American freshwater fauna. Conservation Biology, 1999, 13(5): 1220-1222.
[35] Linke S, Kennard M J, Hermoso V, Olden J D, Stein J, Pusey B J. Merging connectivity rules and large-scale condition assessment improves conservation adequacy in river systems. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(5): 1036-1045.
[36] Linke S, Turak E, Nel J. Freshwater conservation planning: the case for systematic approaches. Freshwater Biology, 2011, 56(1): 6-20.
[37] Maire A, Buisson L, Canal J, Rigault B, Boucault J, Laffaille P. Hindcasting modelling for restoration and conservation planning: application to stream fish assemblages. Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems, 2015, 25(6): 839-854.
[38] Wiens J A, Hobbs R J. Integrating conservation and restoration in a changing world. BioScience, 2015, 65(3): 302-312.